마이크로파 방전 무전극 황전등의 발광 특성 및 나트륨 첨가에 의한 색온도 조절

Emission Characteristics of the Microwave Discharged Electrodeless Sulfur Lamp and Color Temperature Control by Adding Na

이영우*, 박기준,

한국전력공사 전력연구원 에너지환경고등연구소

서론

에너지 절약이 경제적, 환경적 관점에서 점점 중요해지는 시점에 총 전기 에너지 수요의 약 19 %를 차지하는 조명의 효율 향상이 시급하다. 또한 조명은 우리들의 일상 생활과 감성에 크게 영향을 주기 때문에 사람들에게 편안하고 자연스러운 느낌을 줄 수 있는 광의 품질도 효율 못지 않게 중요하며, 조명 기구의 유지보수 비용을 고려하면 전구의 수명도 아주 중요하다. 이 외에도 광원 물질의 유해 여부, 조명 시스템의 설치 용이성 및 주변 환경과의 조화성 등도 중요한 요인이다

1994년 발표된 미국의 Fusion Lighting 사의 무전극 황전등은 에너지 효율, 광의 품질, 유지보수 비용 그리고 광원 물질의 유해 여부 측면에서 우수한 조명 기구로 높이 평가받고 있다. 최근에 개발된 800 microwave watts급 무전극 황전등은 시스템 시감효능이 99 lm/W에 이르고 있다[1]. 이는 연색지수와 수명을 고려하면 메탈할라이드 램프보다 성능이 우수하다고 할 수 있다.

무전극 황전등은 황과 아르곤(Ar) 가스가 들어 있는 석영으로 만들어진 전구를 금속망으로 만들어진 공진기(cavity) 안에 넣고, 2.45 GHz 마이크로파를 입력시켜 먼저 아르곤 가스를 방전시키면 황이 녹으면서 황(S_2) 기체가 방전하면서 주도적으로 빛을 발하게 된다[2]. 이 전등은 전극이 없고 가시광 영역에서의 스펙트럼이 다른 방전등보다 태양 광에 가까우며 자외선이나 적외선은 매우 적다. 그리고 대부분의 방전등과는 달리 수은대신 황을 방전 물질로 사용하기 때문에 전구의 폐기에 따른 환경 오염이 없다.

약 1 kW 급의 무전극 황전등 방전 시스템을 제작하여 황의 양과 마이크로파 입력에 따른 광휘도 및 연색지수(color rendering index)의 변화를 측정하였다. 시감효능은 입력이 증가할수록 황의 양이 많을수록 증가하나 증가하는 정도가 점점 줄어들면서 포화됨을 알 수 있었다. 연색지수는 실험 범위 내에서는 황의 양이 많을수록 마이크로파 입력이 클수록 우수하여 D65 광원을 기준으로 했을 때 최대 79까지 측정되었다. 황의 방전 스펙트럼은 최대 값이 청색 영역에 위치하여서 상관색온도(correlated color temperature)가 높다. 그러나 전구를 회전시켜서 전구 내벽에 형성된 황 기체(S_2) 막에 의해 파장이 짧은 빛이 흡수 되도록 하거나, 황에 나트륨 화합물을 첨가하여 황만 방전시켰을 때 부족한 노란색 부분을 보완하여 상관색온도를 낮추었다.

실험

전구는 석영(SiO_2)으로 만들어진 튜브가 달린 지름이 약 40 mm이고 두께가 약 2 mm 인 유리 볼을 깨끗이 세척한 후 글로브 박스(glove box)에서 황 또는 황과 첨가물을 일정량 투입하고 Ar을 5 torr 정도 채운 후 전구에 달린 튜브를 산소-프로판 불꽃으로 녹여서 봉하였다

공진기는 황동망을 사용하여 원통형으로 제작되었으며 입력되는 마이크로파 에너지를 전구에 집중시켜주는 역할을 한다. 마이크로파 발생을 위하여 2.45 GHz를 발생시키는 전자레인지용 마그네트론을 사용하였으며 마그네트론용 전원장치도 제작하였다. 전구에 입사 및 반사되는 마이크로파 전력을 측정하기 위하여 그림 1과 같이 WR340 도파관형 방전 시스템을 제작하였다. 마그네트론에서 생성된 마이크로파는

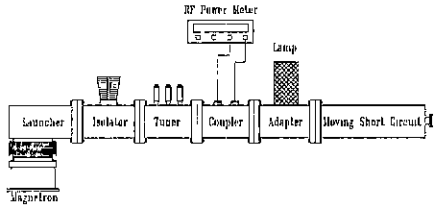

그림 1. 마이크로파 방전 무전극 황전등의 방전 장치.

launcher를 통하여 도파관에 입력되고 tuner와 coupler 그리고 adaptor를 거쳐서 공진기로 입력된다. Coupler에는 마이크로파의 입사전력(forward power)과 반사전력(reflected power)을 읽을 수 있도록 RF power meter를 부착하였다. 반사된 마이크로파는 isolator에서 소진되도록 하여 마그네트론에 재 입력되지 않도록 하였다 앞으로는 마이크로파의 입사전력에서 반사전력을 뺀 값을 간단하게 '입력(input power)'이라고 정의하고 사용하겠다.

공진기 안에서의 전자기장의 모양을 알아보기 위하여 아르곤(99.9999 %) 기체를 넣은 튜브를 공진기에 넣고 마이크로파를 입력하여 방전 모습을 살펴보았다. 아르곤의 방전에 미치는 영향을 알기 위해 황(99.98 %)을 약 20 mg으로 일정하게 하고 아르곤의 양을 각 각 5, 20, 40 torr 넣은 전구의 스펙트럼과 휘도를 측정하였다. 또한 황을 각 각 5.2, 10, 20, 30, 50 mg 넣고 아르곤을 5 torr 넣은 전구를 준비하여 WR340 도파관형 방전 시스템에 넣고 마이크로파의 입사전력을 0.5, 0.7, 0.9, 1.1 그리고 1.3 kW로 조정하면서 방전광의 스펙트럼과 광휘도 그리고 연색지수를 측정하였다. 방전광의 스펙트럼 측정은 Fourier-transform Spectrometer를 이용하였으며, 광휘도와 연색지수는 Spectra-Colorimeter를 사용하여 전구에서 약 4 m 떨어진 거리에서 시야각 1도로 측정하였다. 그리고 전구를 회전하였을 경우의 분광 분포 변화를 알기 위하여 황 50 mg, 아르곤 5 torr를 넣은 황전구를 약 120 rpm으로 회전시키면서 스펙트럼과 상관색온도를 측정하였다. 황 20.9 mg, NaI 82 mg을 함께 넣은 전구를 57 rpm으로 회전시키면서 위와 같은 방법으로 방전 스펙트럼을 측정하였으며, 전구에서 약 80 cm 떨어진 거리에서 광을 취하여 optical spectrum analyzer에 입력하여 전구가 발하는 빛의 스펙트럼을 관찰하며 색좌표를 구하였다.

결과

공진기 안에서의 전자기장의 모양을 알아보기 위하여 아르곤(99.9999 %) 기체를 넣은 튜브를 공진기에 넣고 마이크로파를 입력하였을 때의 방전 모습은 그림 2와 같으며 이로부터 공진기 안의 전자기장의 mode는 TM_{012} mode 임을 알 수 있다[3].

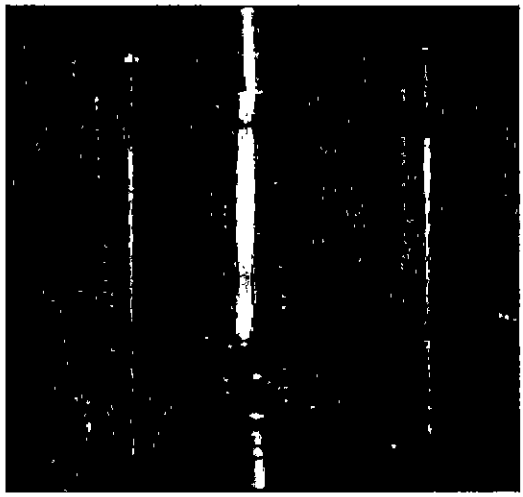

그림 2. 공진기 안의 아르곤 튜브의 방전 모습. 아래위의 어두운 부분이 마디(node)고 가운데와 양끝의 어두운 부분이 배다.

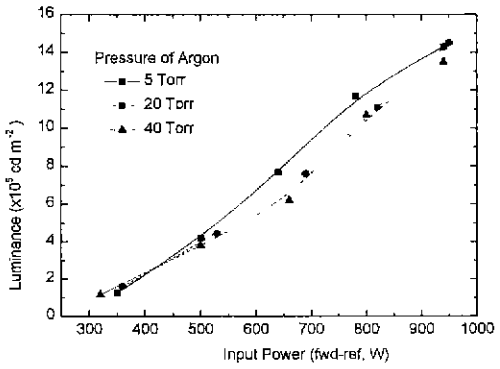

그림 3. 입력에 따른 광휘도 변화 그래프. 아르곤의 압력이 5, 20, 40 torr로 변화하여도 의미 있는 변화를 보이지 않는다.

일정량의 황(약 20mg)에 아르곤의 압력을 달리하면서 얻은 스펙트럼은 큰 변화가 없으며, 광휘도도

일정량의 황(약 20 mg)에 아르곤의 압력을 달리하면서 얻은 스펙트럼은 큰 변화가 없으며, 광휘도도 그림 3과 같이 의미 있는 변화가 없음을 알 수 있다 실제로 아르곤은 초기 방전에만 영향을 주고 황이 방전을 주도하면 방전 스펙트럼에 거의 영향을 주지 않는다 [2].

황의 양과 입력을 달리하면서 아르곤을 5 torr로 고정한 전구들을 방전시켜서 얻은 스펙트럼은 그림 4, 5와 같이 연속적인 모습이며 자외선이나 적외선

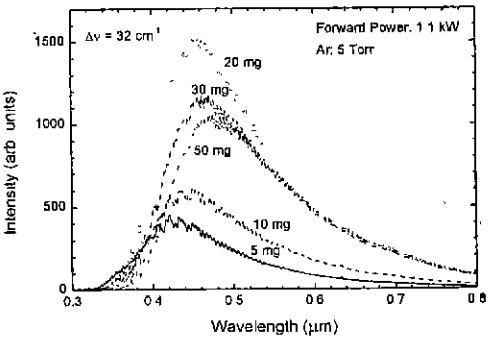

그림 4. 입사전력이 1.1 kW 일 때의 황의 양에 따른 방전광의 스펙트럼 변화 (resolving power. Δv = 32cm^{-1}). 황의 양이 5.2 mg에서 50 mg으로 증가함에 따라 스펙트럼이 긴 파장 쪽으로 약 50 nm 이동한다

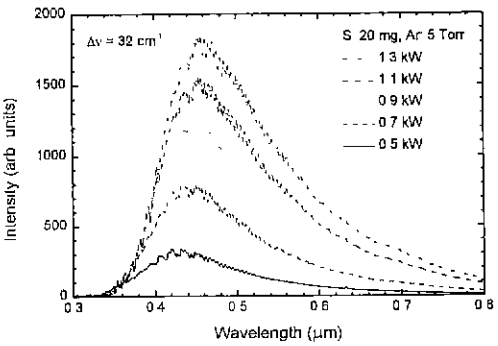

그림 5. 마이크로파 입사전력에 따른 방전광의 스펙트럼 변화 (resolving power Δv = 32cm^{-1}). 입사전력이 0.5 kW에서 1.3 kW로 증가함에 따라 스펙트럼이 긴 파장 쪽으로 약 30 nm 이동한다.

영역에서 광의 세기가 아주 약하며 황의 양과 입력이 클수록 자외선 영역의 광이 줄어드나 적외선 영역의 광은 늘어남을 알 수 있다. 입사전력이 1.1 kW

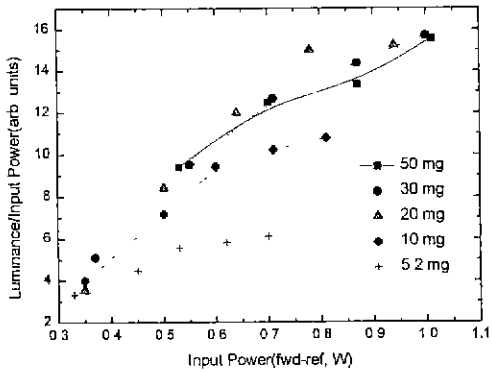

그림 6. 황의 양과 입력에 따른 광휘도/입력 그래프. 시감효능에 비례하는 이 값은 황이 20 mg일 때는 800 W 부근에서, 황이 30, 50 mg 일 때는 1000 W 이상에서 가장 큰 값을 나타낸다.

일 때 황의 양이 많아짐에 따라 스펙트럼이 긴 파장으로 약 50 nm 정도 이동한다 (그림 4). 그리고 황의 양이 20 mg 일 때 입력이 커짐에 따라 스펙트럼이 긴 파장 쪽으로 약 30 nm 정도 이동한다 (그림 5). 이러한 스펙트럼의 이동은 입력이 커질수록 황의 양이 많을수록 방전구 안의 황 기체의 온도와 압력이 높아져 자외선 영역에서 흡수가 일어나기 때문이라고 생각된다. 그러나 이동하는 정도는 입력이 커질수록 황의 양이 많아질수록 줄어들고, 스펙트럼의 최대점이 500 nm 미만의 푸른색 영역에 있어서 상관색온도를 10,000 K 이하로 내릴 수가 없었다.

측정한 광휘도를 입력으로 나누어주면 시감효능에 비례하는 값인 단위 면적당 단위 입체각당의 시감효능(lm · W^{-1} · m^{-2} · sr^{-1})을 구할 수 있다 그림 6은 황의 양이 다른 전구들에 대하여 입력에 따른 광휘도/입력 값들을 나타낸다. 황이 20 mg인 전구는 입력이 800 W 정도에서 가장 우수한 값을, 황이 30, 50 mg인 전구는 입력이 약 1000 W이상에서 큰 값을 나타낸다 실험에 사용한 황전구의 체적이 약 25 cm^{3}이므로 전구의 단위 체적당(cm^3) 약 1 mg의 황이 투입될 때 효율이 우수하다고 할 수 있다.

연색지수는 표 1과 같이 입력과 황의 양이 클수록 증가하여서, 황이 50 mg 인 전구는 입사전력이 1.3 kW일 때 79까지 나타났다. 황의 양이 50 mg 전구를 120 rpm 정도 회전시키면 황 기체가 전구의 내부 표면에 막을 형성하므로 짧은 파장의 빛이 기체에 흡

표 1. 입사전력과 황의 양에 따른 황전등의 연색지수.

황의 양 / 입사전력	연색지수		
	S: 50 mg	S: 30 mg	S: 20 mg
1.3 kW	79	74	69
1.1 kW	75	72	68
0.9 kW	71	69	66

수되어서 스펙트럼은 긴 파장으로 이동한다. 이러한 optical trapping 현상에 의하여 상관색온도가 훨씬 낮아지고 푸른빛이 감소되어 연색지수가 개선될 수 있다. 그리고 마이크로파의 반사전력이 줄어들어 마이크로파가 전구에 더 잘 흡수되는 것을 확인 할 수 있었다. 입사전력이 1.3 kW일 때의 상관색온도는 6,112 K로 회전하지 않을 때의 상관색온도 11,293 K보다 훨씬 낮다 (표 2). 전구를 회전시키면 전구가 균일하게 가열되므로 일부만 지나치게 가열되는 현상으로 인한 전구의 파열을 방지할 수 있고 균일하게 방전시킬 수 있는 장점이 있으나 방전 시스템에 모터가 추가되는 단점이 있다.

표 2. 황이 50 mg인 전구의 회전 유무에 따른 상관색온도 비교.

입사전력 / 상태	상관색온도		
	1.3 kW	1.1 kW	0.9 kW
회전	6,112 K	7,484 K	8,728 K
정지	11,293 K	14,704 K	20,423 K

NaI를 첨가한 전구의 방전 스펙트럼을 보면 그림 7과 같이 황과 나트륨이 함께 방전함을 알 수 있다. 588 nm 부근에 강한 피크가 있는데 이는 Na 원자의 D line으로서 방전광의 색좌표 및 상관색온도가 개선에 기여한다. 그림 8과 같이 입력이 증가하면서 588 nm 부근에서 나트륨의 D line에서 재흡수(self absorption)가 일어나며 선 폭이 증가한다 [4].

Optical Spectrum Analyzer로 측정한 방전광의 CIE 색좌표는 입사전력이 1.3 kW일 때 황(20 mg)만 넣은 전구는 (X=0.2509, Y=0.2932) 이지만, NaI를 8.2 mg 첨가한 전구는 (X=0.3246, Y=0.3629) 이다. 황 20 mg, 아르곤 5 torr를 넣은 전구와 NaI를 8.2 mg 첨가한 전구의 입력에 따른 상관색온도는 표 3과 같으며 NaI를 첨가하여 상관색온도를 크게 낮출 수 있음

표 3. 황만 넣은 전구와 황과 NaI를 함께 넣은 전구의 입사전력에 따른 상관색온도 비교.

입사전력 / 성분	상관색온도		
	1.3 kW	1.1 kW	0.9 kW
S + NaI	5,813 K	6,884 K	8,051 K
S	13,547 K	18,874 K	57,972 K

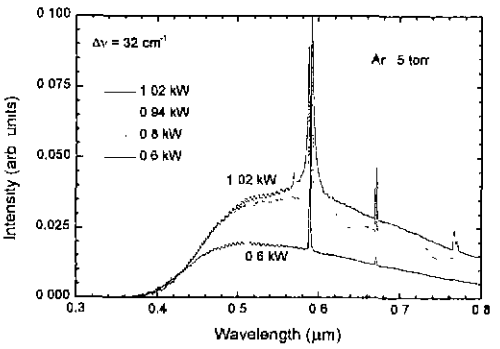

그림 7. 황 20 mg에 NaI 8.2 mg 첨가한 전구의 방전 스펙트럼 (resolving power: $\Delta\nu$ = 32cm^{-1}). 588 nm 부근의 강한 피크가 나트륨의 D line이다.

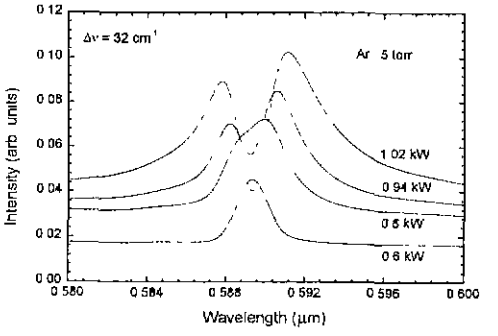

그림 8. 황 20 mg에 NaI 8.2 mg이 첨가된 황전구의 입력에 따른 나트륨 D-line (resolving power: $\Delta\nu$ = 32cm^{-1}) 입력이 증가함에 따라 폭이 넓어진다.

을 알 수 있다. 황 20 mg 아르곤 5 torr만 넣은 전구에 비하여 NaI를 첨가한 전구의 상관색온도는 입력이 1.3 kW 일 때 13,547 K에서 5,813 K로 입력이 1.1 kW 일 때는 18,874 K에서 6,884 K로 각 각 표

준 광원 D55, D65에 가깝게 조절된다. 이 경우에도 전구를 57 rpm으로 회전시켰지만 황의 양이 작고 회전 속도도 작기 때문에 optical trapping에 의한 상관색온도의 감소는 NaI 첨가에 의한 감소에 비하여 작다고 할 수 있다. NaI를 첨가한 전구는 방전 후 육안으로 보아 내부에 이상이 없고 재 점등이 용이하다.

결론 및 토의

제작된 무전극 황전등은 약간 푸른빛을 띠는 백색 광원으로서 연속적인 스펙트럼을 나타내며 연색지수도 79 정도로 우수하다. 시감효능이 최대가 되는 황의 양은 실험 범위 내에서는 전구의 단위 체적(cm^3) 당 약 1 mg 이다. 입력이 증가할수록, 황의 양이 증가할수록 스펙트럼이 긴 파장으로 이동하지만 이러한 이동은 포화되어 색 온도가 10,000 K 이상이다. 그러나 황의 양이 적당히 많은 방전구(S: 50 mg)를 회전시켜 형성된 황기체 막에 의하여 스펙트럼의 짧은 파장을 흡수시킴으로써 상관색온도를 6,113 K까지 개선할 수 있었으며, 황 20 mg에 NaI를 첨가하여 스펙트럼의 노란색 영역을 보완함으로써 상관색온도를 5,813 K까지 조절할 수 있었다 위의 두 가지 방법을 함께 사용하면 더욱 넓은 영역에서 원하는 상관색온도를 갖는 백색광을 만들 수 있을 것이다. 앞으로 다른 우수한 첨가물을 찾아내고 상관색온도 조절에 따른 시감효능 변화를 조사할 필요가 있으며, 시감효능을 높이기 위하여 방전구와 방전시스템의 최적화 연구가 병행될 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] B. P. Turner, M. G. Ury, Y. Leng, and W. G. Love "Sulfur Lamps - Progress in Their Development," Journal of the Illuminating Engineering Society Winter 1997.

[2] 박기준, 구선근, 이영우, 김신중 "마이크로파 방전 무전극 황전등 연구개발," 제 13회 에너지절약기술워샵 논문집 1998.

[3] Om P. Gandhi 1980 "Microwave Engineering and Applications," pp. 247-250 (Pergamon)

[4] J. R. Coaton and A. M. Marsden 1997 "Lamps and Lighting" pp. 113-115 (Arnold London)